

CONSIDERACIONES AL DISEÑO DE DRENAJE SANITARIO Y PLUVIAL CON TUBERÍAS FLEXIBLES EN SUELOS BLANDOS.

Cabrera Delgadillo M. Manuel

Tododren S.A. de C.V.

Camino a Encarnación Km 1.1 s/n, Apodaca N. L. México C. P.66615

manuelcabrera@tododren.net

INTRODUCCIÓN

El suelo sobre el que se asienta la Ciudad de México, representa un reto para todas las edificaciones e infraestructura necesaria para el desarrollo social y económico de sus habitantes. Los suelos profundos y suaves que alguna vez fueron un lago, junto con la extracción del agua del subsuelo, agudizan un proceso de subsidencia del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales, con valores que van de los 2 a 36 cm por año, promediando 13 cm anuales para toda la ciudad.

En específico para el sistema de drenaje sanitario y pluvial, el efecto del hundimiento, provoca la pérdida de la pendiente hidráulica y dislocación de las tuberías de concreto, lo que en el largo plazo reduce su funcionalidad y vida útil, en independencia al deterioro o consumo acelerado de las paredes, debido a un medio atmosférico de gas o vapores de ácido sulfúrico. En este último aspecto, es bien sabido que las tuberías de concreto ofrecen revestimientos interiores y exteriores que mejoran la resistencia contra los ataques químicos; sin embargo, se requiere de un exhaustivo análisis especializado de cimentación, que resuelva las deformaciones lineales debido a hundimientos diferenciales y prevenga la ruptura de falla de la tubería por cargas externas e internas.

Como alternativa se presentan las tuberías plásticas, fabricadas en Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Polipropileno (PP). En especial la tubería de PEAD Corrugada (PEAD-C), se presenta como principal alternativa como sustitución a la tubería de concreto, donde los grandes diámetros demandados por el drenaje sanitario y pluvial, ya no son un obstáculo para la selección de las tuberías plásticas, pero requieren por su propia naturaleza mecánica, de especiales consideraciones para su aplicación al enterrarse en suelos blandos, típicamente clasificados también como plásticos, lo que resulta en una combinación incómoda para el ingeniero responsable del diseño de una conducción de drenaje.

La legislación mexicana aplicable al diseño, construcción operación y mantenimiento de los sistemas de alcantarillado sanitario, establece la necesidad de una certificación de producto, bajo el dictado de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, exigiendo cumplir en correspondencia las especificaciones establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), Normas Mexicanas (NMX) correspondientes, o en su defecto, con la International Organization for Standardization (ISO) o extranjeras aplicables al producto, por ejemplo American Society of Testing Materials (ASTM) y que sean sometidas a la opinión del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua (CCNSA).

En ese orden la NOM aplicable a los sistemas de drenaje es la NOM-001-CONAGUA-2011-Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba; para el caso de las

tuberías de PEAD-C certificadas, la norma mexicana aplicable es la MX-E-241-CNCP-2012-Industria del Plástico-Tubos de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de Pared Estructurada con Junta Hermética de Material Elastómero, Utilizados en Sistemas de Alcantarillado Sanitario-Serie Inglesa-Especificaciones y Métodos de Ensayo, equivalente a la norma ISO 21138, que en la actualidad ofrece soluciones de conducción hasta 1500 mm (60 pulgadas) de diámetro.

Su acertado y extensivo uso en México, generará la aparición de diámetros mayores, llegando incluso llegar a los 3 000 mm (120 pulgadas) con mejores características de resistencia, que son habituales en Asia (Japón), Europa (Alemania) y Norteamérica, estando pendientes de aparecer y usarse en México.

El paso importante para el desarrollo de sistemas de drenaje sanitario y pluvial proyectados con tubería de PEAD-C, es la generación de ingenieros especializados y metodologías de aplicación.

En ese sentido, se propone un lineamiento para cuidar aspectos en el procedimiento de diseño de una conducción que sirva al drenaje sanitario y pluvial, destinado a enterrarse en un suelo fino limo-arcilloso con presencia de agua subterránea.

Dichas condiciones de suelo son comunes a la orilla y en el lecho de cuerpos de agua o como sedimento en terrenos que han sido o son inundables.

OBJETIVO

Exponer y comprender las propiedades ingenieriles de las tuberías de PEAD Corrugado, que deben considerarse en el diseño de las conducciones de drenaje con flujo a superficie libre.

Describir una secuencia de cálculo y su cuidado, que incremente la certidumbre de usar tubería plástica, en especial de PEAD-C, en suelos limo-arcillosos con baja resistencia a la compresión, para la construcción de sistemas de drenaje sanitario y pluvial.

Comprender los criterios y análisis necesarios para desarrollar los cálculos de resistencia de las tuberías plásticas a largo plazo ante la exposición de fuerzas externas como internas.

ANTECEDENTES

La Ciudad de México, presentó en 2017 el “Plan Agua para el Futuro CDMX”, (Aguirre, 2014), estrategia que incluye la rehabilitación, sustitución y ampliación del sistema local de drenaje profundo y semiprofundo, de tubería de red primaria (colectores), red secundaria (atarjeas) y colectores marginales, en un plazo de 30 a 50 años, por un monto equivalente a los 5 mil millones de dólares.

Por el plazo planteado, es muy probable que, de construir de forma tradicional, con estructuras y tuberías de concreto, el plazo de vida útil de los elementos a rehabilitar, sustituir o

ampliar, coincida con el plazo de inversión, por lo que la rentabilidad de la inversión de capital se verá reducida o anulada. Es así que debe considerarse una infraestructura robusta con larga vida útil y con el menor costo posible. Es donde el conocimiento de la problemática, la reunión de la información pertinente al proyecto, la evaluación de soluciones en pasos y la verificación de la opción de proyecto son cruciales para resolver un proyecto de infraestructura. En ese sentido cabe hacer la mención que la Ciudad de México desde el año 2013 participa en la iniciativa 100 Ciudades Resilientes (100RC, por sus siglas en inglés), la cual busca que dichas ciudades estén preparadas para la construcción de resiliencia urbana en torno a los desafíos sociales, económicos y físicos del siglo XXI.

La construcción de resiliencia en la ciudad depende de la evaluación de la vulnerabilidad y los impactos históricos, el entendimiento e interpretación de escenarios de riesgos futuros (por ejemplo, escenarios de cambio climático), así como del entendimiento de los procesos socio económicos y socio ecológicos que aumentan la vulnerabilidad relacionada con las tensiones más relevantes en la ciudad, (OR CDMX, 2016).

En relación a la vulnerabilidad e impactos históricos, se debe recordar que, desde tiempos precolombinos, se llevaron a cabo obras hidráulicas para manejar y controlar el nivel del agua de los lagos durante la temporada de lluvias y mitigar inundaciones, de una cuenca endorreica que tiene más de 9 mil kilómetros cuadrados, que incluye las entidades federativas de Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala con una pequeña zona en el estado de Puebla. Labores que se continuaron en la etapa colonial con un sentido diferente, llevando a la construcción de enormes drenes, tajos y túneles para secar los lagos y llevar el exceso de agua fuera de la cuenca, alterando el sistema lacustre, definiendo una nueva relación entre la lluvia y la sociedad.

La alteración de los sistemas lacustres generó un fuerte estrés hídrico, por la presión que ejerce una de las megaciudades más pobladas del mundo, que extrae del subsuelo la fuente principal de suministro de agua potable de forma inadecuada, provocando el hundimiento del suelo y la dislocación del drenaje urbano.

En la segunda mitad del siglo XX, la Ciudad de México ha resuelto el problema del manejo de lluvias con grandes obras ingenieriles que han controlado la excedencia de lluvias en conjunto con el drenaje sanitario, generando un sistema de drenaje mixto de grandes dimensiones, tanto longitudinales como diametrales, que inclusive ha alcanzado su estimación de vida útil, además de ser afectado por los hundimientos superficiales regionales, reduciendo la eficiencia de su funcionamiento y provocando en la última década, sustituciones y reparaciones en puntos importantes de la ciudad, que son detectadas de forma tardía, a través de la presencia de socavones e inundaciones.

Atendiendo la importancia del sistema local de drenaje profundo y semiprofundo, de tubería de red primaria (colectores), el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), realiza un estudio del estado de ésta infraestructura, detectando que el sistema profundo se ha mantenido de manera adecuada y que debe ser ampliado, lo que se ha traducido en los estudios y proyectos ejecutivos de los Túneles Indios Verdes y Miramontes, donde se requiere una

inversión de 10 mil millones de pesos adicionales al presupuesto anual de la ciudad. En lo relativo a la red secundaria, compuesta de atarjeas y colectores de diámetros mayores a 1,50 m, se identifican 185 km de tuberías de drenaje que requieren su rehabilitación o sustitución.

Ante tal reto que se acentúa con el paso de los años, es significativo comprender la opción que representan las tuberías de PEAD-C considerando las condiciones que dictan el diseño de un sistema de drenaje sanitario.

CONSIDERACIONES AL DISEÑO DE DRENAJE SANITARIO Y PLUVIAL

Secuencia de diseño

En prescripción de prioridades, al existir infraestructura de drenaje en la ciudad de México, se tienen en el primer orden de restaurar, los Proyectos de Reposición, destinados a sustituir un colector que ha concluido su vida útil y presenta graves daños estructurales; en seguida se agrupan aquellos que, sin presencia de importantes daños estructurales, ya alcanzan una vejez importante y se requiere aumentar su capacidad de conducción, se denominan Proyectos de Ampliación, finalmente dos tipos, aquellos determinados como Proyectos de Mejoramiento, para aumentar o recuperar su eficiencia de conducción y Proyectos de Conservación, para mantener su buen funcionamiento.

Es así, que se propone una secuencia de diseño al proyecto de drenaje que permita establecer de forma ordenada y eficiente la logística de las actividades, ver Figura 1, que muestra un diagrama de la secuencia propuesta. El detalle de cada paso o fase se describe en adelante.

La secuencia de cálculo y su cuidado, tiene el objetivo de incrementar la certidumbre de usar tubería plástica, en especial de PEAD-C, en suelos limo-arcillosos con baja resistencia a la compresión, para la construcción de sistemas de drenaje sanitario y pluvial. Esta planificado en fases que se determinan por los cálculos necesarios y las necesidades de control de resultados, con seguimiento de una secuencia lógica, con un inicio y un fin, para producir las memorias entregables y su correspondiente evaluación.

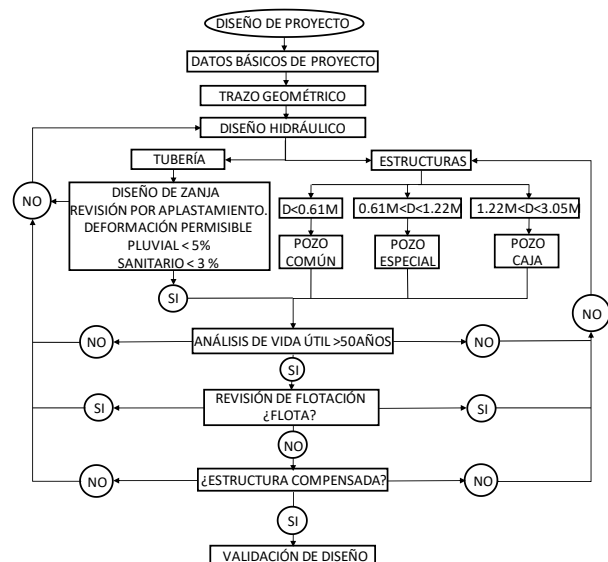


Figura 1. Diagrama de Diseño

Las fases se dividen por hitos de decisión, y cada fase tendrá como resultado al menos un entregable; hitos y entregables pueden variar dependiendo de los responsables, decisiones y resultados. Los entregables facilitan la gestión y particularmente, el control del proyecto. Al final de la última fase, se tiene que desarrollar un proyecto de drenaje sanitario y/o pluvial, aplicando tuberías de PEAD-C con certeza de resistencia a largo plazo, ante la exposición de fuerzas externas como internas.

En paralelo a la secuencia propuesta se debe evaluar la conservación de viabilidad económica del proyecto, con inclusión de costos debidos a los procesos constructivos pertinentes.

Suelo Blando

Característico del centro Valle de México, el suelo lacustre se forma por depósitos formados de manera predominante por partículas finas, limo y arcilla, tienen grandes contenidos de humedad los cuales llegan a un grado de saturación del 100%, tiene alta plasticidad (cuando el límite líquido es mayor al 50%), se caracterizan por su baja consistencia y baja resistencia (Baja capacidad de resistir carga), alta compresibilidad y alta deformación; características que son capaces de generar grandes asentamientos en las cimentaciones construidas sobre ellas y es un material impermeable.

Los suelos arcillosos suelen hincharse cuando se exponen a la humedad (expansión de la arcilla) y se contraen cuando la humedad del suelo disminuye, esto representa un problema para las cimentaciones desplantadas en este tipo de suelo, ya que el suelo buscará separarse de la estructura al expandirse.

Por lo que se refiere al suelo del valle de México, es importante considerar, el nivel de humedad del suelo donde se proyecte, porque la arcilla es dura cuando tiene poca humedad, al tener humedad se torna plástica y moldeable, lo que dicta el tipo de cimentación para una tubería.

Propiedades ingenieriles de las tuberías de PEAD Corrugado

Conforme la NOM-001-CONAGUA-2011, se establece la necesidad de un sistema de drenaje sanitario hermético permanente en toda su vida útil, con obligatoriedad para fabricantes, importadores o comercializadores, al igual para diseñadores, instaladores, constructores, y quienes mantienen y operan los sistemas de drenaje sanitarios, conforme las especificaciones establecidas en la norma de fabricación de la tubería.

Para las tuberías de PEAD-C comercializadas en México, la norma aplicable es la MX-E-241-CNCP-2012, en ella se establece la calidad y propiedades de la resina de polietileno, aplicando la norma ASTM D3350-14 Especificación estándar para tuberías de plástico de polietileno y materiales de accesorios. La especificación incluye un sistema de designación por celda de clasificación de seis dígitos, mediante el cual se clasifica la resina de PEAD con la celda **435420C**, de acuerdo con las siguientes propiedades físicas: 1) Densidad (4), entre 947 - 955 kg/m³; 2) Índice de fluidez (3), de 0,4 a 0,15 g/10 minutos a 190°C a 2,16 kg de peso; 3) Módulo de flexión (5), 758 MPa -<1103 MPa; 4) Esfuerzo a la tensión (4), 21 MPa -<24 MPa; 5) Resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental (2), Condición B, 100% Igepal 24 horas y 50 %

máximo de falla; 6) Base de diseño hidrostático (0), No aplica; y Contenido de negro de humo (C), 2% a 4% en masa.

De las anteriores definiciones deben considerarse para el diseño del alcantarillado las siguientes propiedades de la celda de clasificación:

- Clase 5) Resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental (ESCR), valor (2), señala que se hará la prueba en la condición 2, sumergida 100% en Igepal, por 24 horas y no debe tener más de 50% de falla.

Debe resaltarse la inclusión en la norma MX-E-241-CNCP-2012 de la prueba Resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental, ESCR o Slow-Crack- Growth Resistance, que mide la resistencia de largo plazo. El antecedente de solicitarla, es para garantizar la vida útil de largo plazo a 50 años o más y los fabricantes están obligados a cumplirla. Actualmente a los fabricantes de tubería de PEAD-C, también se les solicita como segunda muestra de control, la prueba NCLS (Notched, Constant Ligament-Stress), incluida también en la norma NMX-E-241-CNCP-2012. Con base a los resultados del ensayo NCLS se estableció la especificación del material para una vida útil de 100 años para las tuberías de PEAD-C.

- Clase 6) Base de diseño hidrostático, valor (0), No aplica.

Define una baja resistencia a la presión interna, suficiente al corto plazo para sostener una presión interna de prueba hasta 0,05 MPa (0,5 Bar), debe ser mantenida durante 15 minutos por unión, limitando la conducción de las aguas en su interior, a exclusiva operación a superficie libre.

- Contenido de negro de humo (C), 2% a 4% en masa.

Da protección a los rayos UV y permite su permanencia sin daño bajo exposición al sol durante su vida útil.

Bajo la denominación de *Serie Inglesa*, o también conocido como Diámetro Interior Controlado (DIC), donde el diámetro nominal (Dn) corresponde y coincide con el diámetro interior (D) y el espesor mínimo (e), crece hacia el exterior de la tubería. Lo contrario ocurre en la *Serie Métrica* o Diámetro Exterior Controlado (DEC), el diámetro nominal (Dn) coincide con el diámetro exterior (De) de la tubería y el espesor (e) crece con dirección al interior de la tubería, por lo que el diámetro interior (D) debe corregirse para cálculos hidráulicos.

Se define en la norma la Rigidez de la tubería (PS), como la característica mecánica de un tubo, que es una medida de la resistencia a la deformación anular bajo una fuerza externa, estableciendo una deformación diametral (Δy) permitida de hasta 3% del diámetro para drenaje sanitario y hasta 5% para drenaje pluvial. Tal valor resulta de pruebas NMX-E-208-CNCP o la norma ASTM D 2412, y es el valor obtenido al dividir la fuerza por unidad de longitud de la muestra entre la deflexión resultante, ver Ec. (11).

Principalmente este conjunto de características, son la base de conocimiento que se debe tener respecto de la tubería de PEAD-C, por parte del ingeniero proyectista.

Datos básicos de proyecto

Coincidiendo con el análisis urbano se requieren conocer y evaluar los datos básicos, siendo cantidad y clase de población que servirá el colector, estimando la cantidad de aguas sanitarias producidas en condiciones actuales y estimar un horizonte de vida útil y económica del proyecto planificado a la

saturación, en correspondencia con la duración de los materiales; además evaluar la recepción de las aguas de escurrimiento por lluvia, lo que permite proponer el gasto de diseño y las condiciones hidráulicas de operación, evitando la posibilidad de operar con carga de presión, en exclusivo flujo a superficie libre. En caso de considerarse una posible carga de presión, se debe considerar hasta en máximo la condición de prueba de carga de presión de 50 kPa (5 mca) y tiempo conforme la NOM-001-CONAGUA-2011.

Trazo geométrico

Los proyectos de primera y segunda prioridad requieren de labores mayores de construcción, como lo es la zanja abierta; por lo que se requiere de conocer el ambiente urbano e infraestructura subterránea alrededor del trazo de tuberías, para determinar la posibilidad de un trabajo de construcción de un nuevo colector paralelo y relevando al existente, o la necesidad de obras de desvío temporales, que trasvasen las aguas sanitarias entre subcuencas urbanas, para sustituir el existente; por lo que un levantamiento topográfico a detalle es imperativo, lo mismo que la detección de infraestructura subterránea, lo que define el trazo y parte del proceso constructivo. Se debe buscar que el flujo sea por gravedad, considerar que las conexiones serán con pozos de visita, en cruces, cambios de dirección, cambio de pendiente, cambio de diámetro, y para dividir tramos que excedan la longitud recomendada, al igual que cambios de material de tuberías.

Diseño Hidráulico

En un sistema de drenaje solo debe de presentarse flujo a superficie libre, estado que cumple un flujo a gravedad y ventilado. Para simplificar el diseño, se consideran condiciones de flujo establecido y en estado permanente, el estado de flujo uniforme es el criterio que rige el área de la sección hidráulica mínima requerida, bajo la igualdad siguiente.

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = A Rh^{2/3} \quad (1)$$

Donde Q , es el gasto en m^3/s ; n , es el coeficiente de rugosidad de Manning en $s/m^{1/3}$, (0,010 para PEAD-C); S , es la pendiente (menor a 4%); A , es el área en m^2 y Rh , es el radio hidráulico en m.

Se deben de cumplir dos condiciones importantes:

1. Diseño al 80% de la capacidad hidráulica ($y=0,8 D$) en donde "y" es tirante y "D" diámetro, para drenaje sanitario, permitiendo el flujo de gases al exterior y el acceso de presión atmosférica, o Diseño al 96% de llenado para drenaje pluvial.
2. Velocidad permisible (v): mínima (0,6 m/s) y máxima (5,0 m/s).

Las características que se determinarán a través de la Ec. (1) serán pendiente y dimensionamiento del diámetro.

En este punto es importante considerar los hundimientos regionales diferenciales y el efecto sobre la pendiente propuesta, generando distintos escenarios posibles de tendencia de deformación lineal, para 15, 20 o más años, a lo largo del proyecto de trazo, con la intención de proponer un desnivel inicial y predecir la deformación en el perfil del proyecto, con el objetivo de mantener, un perfil de horizonte de deformación futura favorable al sentido del escurrimiento de proyecto.

Debido a su importancia, la autoridad gubernamental de la Ciudad de México, mantiene actualizado un mapa de hundimiento del suelo a través del SACMEX, que representa las zonas donde el suelo tiene un movimiento vertical lento, debido a las condiciones de compresibilidad propias del suelo, producidas principalmente por la intensidad en la extracción del agua del subsuelo, que es considerado para valorar el desnivel a futuro, que afecte el perfil del colector o la pendiente de operación, lo que define el efecto a futuro del comportamiento hidráulico.

Es importante en este punto precisar la necesidad de estructuras especiales como pozos/cajas de caída, captación, excedencias, disipación de energía, de control y seccionamiento, así como de cambios de régimen de flujo, transitorios hidráulicos y especiales según la operación que los colectores requieran.

Análisis Estructural

1. Tubería

El conocimiento de la calidad de suelo en el trazo del proyecto, según su granulometría y características mecánicas o geotécnicas, son importantes para determinar el modelo de cimentación, material y resistencia del acostillado por el tipo de tubería a emplear, estimando si los materiales a excavar son útiles al reúso o no; así como, determinar lo necesario para el proceso de instalación de la tubería y su correcto enterramiento, en este punto debemos distinguir como instalación, al proceso de acoplamiento y unión de la espiga-campana y prueba de hermeticidad de la tubería, mientras que construcción son las labores de cimentación de la tubería, mediante la colocación de la plantilla, acostillado de la tubería con materiales de resistencia a la compresión adecuados hasta 30 cm por arriba del lomo de la tubería y relleno final de la zanja.

En el estudio de tipo de tubería a emplear se deben distinguir dos tipos, tuberías Rígidas o Flexibles. Es un hecho que los tubos flexibles proporcionan una rigidez significativamente menor en comparación con las tuberías rígidas (ej. tuberías de concreto); sin embargo, se comportan notablemente bien cuando son enterradas en el suelo confinadas con materiales apropiados.

Como materiales apropiados debemos atender la clasificación de suelos con fines de ingeniería proporcionados por la norma ASTM-D-2321 Práctica estándar para la instalación subterránea de tuberías termoplásticas para alcantarillas y otras aplicaciones de flujo por gravedad y ASTM D 2487 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), siendo:

Clase I, Roca triturada, angular: GW, GP, GM, GC, 100% pasa el tamiz de 38 mm, $\leq 15\%$ pasa el tamiz N° 4, $\leq 25\%$ pasa el tamiz de 9,5 mm y $\leq 12\%$ pasa el tamiz N° 200.

Clase II, Suelos limpios de grano grueso: SW, SP, GW o cualquier suelo que comience con uno de estos símbolos que contenga $\leq 12\%$ que pase por el tamiz N° 200.

Clase III, Suelos de grano grueso con finos: GM, GC, SM, SC o cualquier suelo que comience con uno de estos símbolos que contenga más de 12% que pasa el tamiz N°200; suelos arenosos o con grava de grano fino: CL, ML o cualquier suelo que comience con uno de estos símbolos, con $\geq 30\%$ de material retenido en el tamiz N° 200.

Clase IV, Suelos de grano fino: CL, ML o cualquier suelo que comience con uno de estos símbolos con menos de 30% de material retenido en el tamiz N° 200

Los suelos Clase V, NO deben ser usados para confinamiento o acostillado de tuberías plásticas como el PEAD-C, suelos de grano fino con 50% o más pasa por un tamiz N° 200, limos y arcillas límite líquido 50 o mayor se excluyen, al igual los suelos con los siguientes símbolos: MH, CH, OL, OH, PT, o suelos altamente orgánicos.

Recordando el significado de la simbología usada en el SUCS, G grava, S arena, M limo, C arcilla, O orgánico, P pobremente graduado, W bien graduado, H alta plasticidad, L baja plasticidad.

Los tipos de suelos a utilizar para el acostillado de la tubería abarcan los agregados naturales, manufacturados y procesados, que proporcionen un valor alto de rigidez o de módulo de reacción del suelo en kPa.

A medida que aumenta el número de clase del suelo disminuye su rigidez a un determinado nivel de compactación y requiere un mayor esfuerzo de compactación para proveer un específico nivel de rigidez de suelo.

Reconocida la interacción suelo-tubería y efectos, se debe evaluar la combinación de un suelo blando con tubería rígida o tubería flexible con uso de suelo rígido, lo que determinará el método de estimación y resistencia de la tubería ante la carga de suelo o carga muerta sobre el tipo de tubería, cargas vivas, factores de plantilla y resistencia de acostillado.

En consecuencia, es necesaria una rigidez de suelo alta, para una tubería flexible como la PEAD-C y en el Valle de México, se da pertinencia al uso de suelos Clase I y II ligeros para el acostillado de la tubería, como la espuma volcánica (Tezontle en México).

La metodología para el diseño de zanjas con base en las Teorías de Spangler y Marston's para tuberías flexibles, es la siguiente.

Existen tres parámetros que son esenciales en el análisis y diseño de cualquier instalación de un conducto flexible:

1. Cargas (muertas debido a la profundidad del relleno y cargas vivas debido al tránsito de vehículos).
2. El módulo de reacción del suelo.
3. La rigidez de la tubería.

Estos tres elementos se sintetizan en la ecuación conocida como de IOWA Modificada (A. Moser, 2001), quienes la proponen para dar una aproximación al valor de la deflexión que ocurre en un tubo flexible bajo la carga del suelo, y establece:

$$\Delta y = \frac{(DLWC + WL)K}{(0,149PS + 0,061E') * 101,97} \quad (2)$$

Donde Δy , es la máxima deflexión diametral permisible en m; D, es el diámetro nominal de la tubería en m; DL, es el factor de deflexión de retraso, con valor de 1.5; WC, es la carga muerta sobre la tubería en kg/m; WL, es la carga viva sobre la tubería en kg/m; K, el coeficiente de plantilla (adimensional); PS, es la rigidez de la tubería en kPa y E' , es el módulo de reacción del suelo en kPa.

Debiéndose cumplir: a) Drenaje pluvial $\Delta y < 5\%$, b) Drenaje sanitario $\Delta y < 3\%$.

El numerador de la Ec. (2) conjunta los elementos que efectivamente aplastan la tubería, como son la carga muerta

(WC), derivada del medio de suelo y la carga viva (WL). El denominador de la Ec. (2) considera los elementos de resistencia al aplastamiento, que son la Rigidez de la tubería (PS) y el Módulo de Reacción del Suelo (E'), ver Fig. 2.

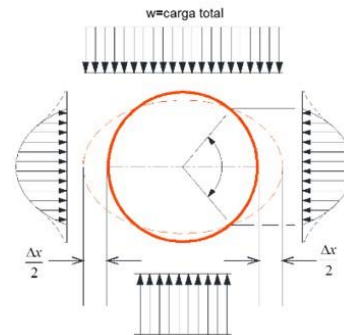


Figura 2. Diagrama de aplicación de fuerzas sobre una sección circular Ec. (2)

Estimación de Carga Muerta. La carga estática producida sobre la tubería enterrada deberá ser calculada mediante la ecuación de Spangler y Marston's (A. Moser, 2001):

$$W_C = C_d \gamma (B_d)^2 \quad (3)$$

Donde W_C , es la carga muerta sobre el tubo en kg/m; C_d , es el coeficiente de carga basado en H_c/B_d .

$$C_d = \frac{1 - e^{-2K\mu \times H_c/B_d}}{2K\mu} \quad (4)$$

Donde γ , es el peso volumétrico del material de relleno en kg/m^3 ; B_d , es el ancho de la zanja en la parte superior del tubo en m; H_c , la altura de relleno sobre el lomo del tubo en m; K , es la relación de la presión lateral activa con respecto a la presión vertical; μ , es el coeficiente de fricción de deslizamiento entre material de relleno y zanja.

En este punto es importante decidir el ancho B de la zanja, como puede verse de la ecuación (3), tiene un valor matemático independiente del diámetro de la tubería, el ingeniero de proyecto lo puede establecer, conforme otras necesidades, como lo dictado por los reglamentos o manuales de revisión a que es sujeto de cumplimiento o en mayor medida debido al método y herramental usado para la compactación del acostillado de la tubería.

Para efectos de cálculo del coeficiente C_d , la Tabla 1, muestra valores experimentales del producto $K\mu$.

Tabla 1. Valor de $K\mu$

Tipo de suelo	Valor máximo de $K\mu$
Material granular sin cohesión	0,192
Arena y grava	0,165
Capa superior del suelo saturada	0,150
Arcilla	0,130
Arcilla saturada	0,110

Estimación de Carga Viva. Para el cálculo de cargas vivas sobre la tubería, se utiliza el siguiente procedimiento basado en los requerimientos de la AASHTO LRFD (American Association Of State Highway and Transportation Officials Load and Resistance Factor Design) (AASHTO, 1999) que establece:

$$W_L = \frac{M_P \times P \times I_f}{(L_1)(L_2)} \quad (5)$$

Donde W_L , es la carga viva sobre la tubería en kg/m; M_p , es el factor de presencia múltiple de carga (1,2 adimensional); P , es la magnitud de carga de ruedas en kg (Camión H-20, 9 000 kg); I_f , es el factor de impacto.

$$I_f = 1 + 0.33[(2.44 - h)/2.44] \quad (6)$$

Donde h , es la altura de relleno sobre la tubería en m; L_1 , es la longitud de carga en dirección paralela a la dirección del tráfico en m.

$$L_1 = t_1 + LLDF(h) \quad (7)$$

Donde t_1 , es la longitud de la huella de la llanta, 0,25 m; $LLDF$, es el factor de distribución de carga viva (1.15 para SC1 [Suelo Clase I] y SC2 [Suelo Clase II] y 1 para otros); L_2 , es la longitud de carga en dirección perpendicular a la dirección del tráfico en m.

$$\text{Si } h \leq h_{INT}, L_2 = t_w + LLDF(h) \quad (8)$$

t_w , el ancho de la huella de la llanta, 0,50 m.

$$\text{Si: } h > h_{INT}, L_2 = [t_w + 1,83 + LLDF(h)]/2 \quad (9)$$

h_{INT} , es la profundidad en el que la carga de las llantas interactúa en m.

$$h_{INT} = (1,83 - t_w)/LLDF(h) \quad (10)$$

Las categorías de rigidez del suelo, sobre los que definen el factor de distribución de carga viva ($LLDF$), se establecen de acuerdo con la norma ASTM D 2487.

Toda tubería plástica conforme la resistencia mínima del suelo proporcionado por el módulo de reacción del suelo (E'), debe tener una cobertura mínima de 90 cm por arriba de su lomo o en caso contrario calcularse. La carga muerta siempre aumentará su valor en correspondencia con el enterramiento de la tubería, en sentido inverso se comporta la carga viva, llegando el punto de desprejarse para altura de tierra de 1,90 m por arriba del lomo de la tubería.

El valor de coeficiente de plantilla K de la Ec. (2), refleja el grado de soporte proporcionado por el suelo en la parte baja de la tubería. La tabla 2 muestra los valores de K dependiendo del ángulo de plantilla, debido a la zona de contacto con la tubería y el eje de la tubería, ver Figura 3. Estableciendo el contacto de la plantilla con la tubería al tercio central del diámetro de la tubería, el ángulo de plantilla corresponde a 60° , por lo tanto, K adquiere el valor de 0,102.

Tabla 2. Valores de Coeficiente de Plantilla K

Ángulo de plantilla en grados	K
0	0,110
30	0,108
45	0,105
60	0,102
90	0,096
120	0,090
180	0,083

Puede observarse los valores del coeficiente de Plantilla K , se reducen conforme el ángulo se incrementa, lo que favorece a la reducción de las cargas viva y muerta.

Bajo esta consideración, a las tuberías plásticas les favorece ser soportadas desde la base de la tubería hasta su eje medio horizontal, si el ingeniero de proyecto considera esta solución de acuerdo a los análisis anteriores y siguientes, puede igualar la clase de suelo empleado en la plantilla y acostillado.

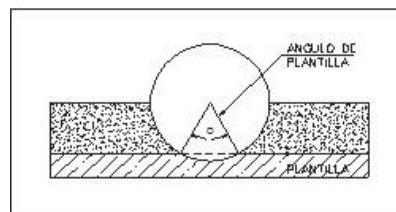


Figura 3. Ángulo de Plantilla

Rigidez de la Tubería. El valor de Rigidez de la Tubería (PS) es un valor determinado por medio de una prueba de resistencia a la flexión, según la norma ASTM D 2412-Método de prueba estándar para la determinación de características de carga externa de tubos de plástico mediante la carga de placas paralelas, y es el valor obtenido al dividir la fuerza por unidad de longitud de la muestra entre la deflexión resultante; de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$PS = F/\Delta y \quad (11)$$

Donde PS , es la rigidez de la tubería en kPa; F , es la carga aplicada a la tubería para producir un porcentaje de la flexión, en N/m; Δy , es la longitud de cambio del diámetro interior en dirección de aplicación de carga, en m.

El valor de rigidez se informa por parte del fabricante acorde a los resultados de pruebas, superando o igualando el valor mínimo dictado por la norma, siendo para diámetros de 100 mm a 250 mm de 304 kPa, 300 mm 345 kPa, 375 mm 290 kPa, 450 mm 275 kPa, 600 mm 235 kPa, 750 mm 195 kPa, 900 mm 150 kPa, 1060 mm 140 kPa, 1200 mm 125 kPa y 1500 mm 95 kPa.

Módulo de Reacción del suelo (E'). En el diseño de tubería flexible enterrada, la rigidez del suelo ha sido tradicionalmente modelada usando E' . Este es un parámetro semi-empírico requerido para la estimación de la deflexión de la tubería enterrada; y depende de factores como tipo de suelo, contenido de finos y grado de compactación, el material se clasifica acorde a la ASTM D 2487.

Tabla 3. Valores Promedio del Módulo de Reacción del Suelo (E')

Tipo de suelo de acuerdo a Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	E' para el grado de compactación del encamado, Mpa		
	Ligero < 85% Proctor	Moderado 85-95 % Proctor	Alto >95 % Proctor
CH,MH,CH-MH	Utilice $E' = 0$		
CL,ML,ML-CL,CL-CH,ML-MH	1,4	2,8	6,9
CL,ML,ML-CL,CL-CH,ML-MH,GM,GC,SM,SC	2,8	6,9	13,8
GW,GP,SW,SP	6,9	13,8	20,7
Roca triturada	20,7	20,7	20,7

Si los resultados determinan el uso de materiales granulares para el acostillado de la tubería, conviene homologar la clase de suelo entre plantilla, acostillado y primera capa de enterramiento de la tubería de 30 cm arriba del lomo de tubo, como se muestra en la Figura 4.

La clase de suelo de plantilla, como cimentación de la tubería, deberá ser de mayor o igual resistencia a la compresión o de módulo de reacción de suelo (E') que la clase de suelo empleado de acostillado, en un espesor mínimo de 15 cm y tenderse en todo el ancho B de zanja y longitud de tubería, ya

que recibe tanto a la tubería como al material de acostillado, debe cubrir las irregularidades del suelo debido a la excavación y evitar el contacto de la tubería con raíces o piedras.



Figura 4. Acostillado con grava

Considerando lo anterior conviene revisar las características mecánicas del suelo nativo, si el suelo no presenta resistencia alta a la compresión o no puede soportar un corte vertical, conviene aplicar un confinamiento de la tubería tipo piramidal, como lo recomienda ASTM D 2321 como se ilustra en la figura 5, que muestra la geometría recomendable y es aplicable también cuando se instala en condiciones de terraplén.

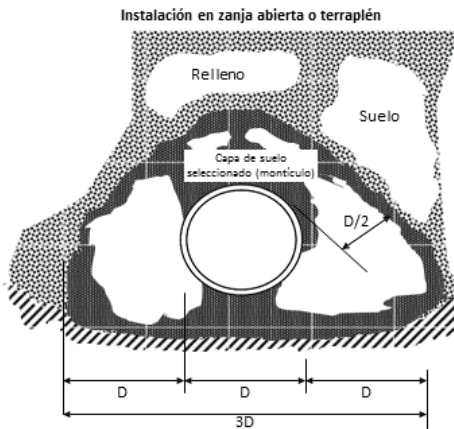


Figura 5. Acostillado piramidal con grava

2. Estructuras

Como parte del sistema de drenaje, se proyectarán geoméricamente conforme al diseño hidráulico realizado en anterioridad, considerando diámetro de tubería y profundidad, topografía, suelo nativo y los requerimientos estructurales de cada elemento. Es imprescindible considerar que la conexión de un diámetro menor a uno mayor es clave con clave, es decir en coincidencia de los niveles interiores superior de cada tubería, por lo que hay que contemplar escalones y en algunos casos pozos de caída, en especial para el diseño de cimentaciones y muros perimetrales en carga.

Análisis de Vida Útil

La vida útil es el periodo de tiempo durante el cual la obra hidráulica cumple correctamente con las funciones para las que se ha diseñado. Considerando la vida estimada para las tuberías de PEAD-C en por lo menos 50 años, la resistencia de las estructuras debe tolerar ataques químicos y el correcto mantenimiento que se le dé.

Para el concreto es indispensable una resistencia a la compresión mínima de 29.50 MPa, espesores de recubrimiento al acero de refuerzo en mínimo de 5 cm y Cemento Resistente a los Sulfatos, acorde a la exigencia de las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras (NTCE) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2017).

Revisión de Flotación

La flotación ocurre cuando el agua subterránea que rodea la tubería produce una fuerza vertical ascendente mayor que la suma de las fuerzas descendentes proporcionadas por el peso del suelo, la fricción del suelo, el peso de la tubería y el peso de su contenido.

Por lo general, la flotación no es una consideración de diseño para tuberías enterradas donde la tubería se encuentra llena o casi llena de líquido o donde el agua subterránea está siempre por debajo de la tubería, sin embargo, este problema puede causar una reducción significativa del soporte del suelo alrededor de la tubería y permitir que la tubería se doble por la presión hidrostática externa, por lo que debe de revisarse.

Este no es un problema exclusivo de las tuberías de plástico, ya que el principio de Arquímedes afirma que “todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado”, por lo que cualquier cuerpo sin importar su geometría y peso, está expuesto a este fenómeno.

En la revisión por flotación, se considerará una posición conservadora del nivel freático y se establece el siguiente procedimiento de revisión:

$$F_{VA} < P_T + P_{SS} + P_{SD} + P_{LC} \quad (12)$$

Donde F_{VA} , es la fuerza vertical ascendente o fuerza de flotación en kg/m.

$$\text{Para tubería: } F_{VA} = \gamma_o \frac{\pi D_e^2}{4} \quad (13)$$

$$\text{Para estructuras: } F_{VA} = \gamma_o * A_T * h_o \quad (14)$$

Donde A_T , es el área unitaria transversal de la estructura en m^2/m ; D_e , es el diámetro exterior en m; h_o , es la profundidad de la estructura en presencia de agua en m; γ_o , es la densidad del agua en kg/m^3 ; P_T , es el peso de la tubería, en kg/m.

$$P_T = 0.955\pi D_e^2 \frac{(1.06RD - 1.12)}{RD^2} \quad (15)$$

P_{SS} es el peso del suelo saturado, en kg/m.

$$P_{SS} = (\gamma_{SS} - \gamma_o) \left[\frac{D_e^2(4-\pi)}{8} + D_e H_{SS} \right] \quad (16)$$

P_{SD} es el peso del suelo seco, en kg/m.

$$P_{SD} = \gamma_S (H_C - H_{SS}) D_e \quad (17)$$

Donde γ_{SS} , es la densidad del suelo seco en kg/m^3 ; H_C , es la altura o profundidad de enterramiento en m; H_{SS} , es la altura de suelo saturado por arriba del tubo en m; P_{LC} , es el peso del líquido contenido en kg/m.

$$P_{LC} = \gamma_o \frac{\pi D^2}{4} \quad (18)$$

Factor de Seguridad de Flotación

La revisión por flotación se realiza a partir de comprender la fuerza vertical ascendente y balancearla o contrarrestarla con la carga de suelo de relleno de la zanja por arriba del lomo de tubería y en el caso de las estructuras, la suma del peso total de la estructura, incluyendo muros, losa, etc. más la fuerza de adherencia (materiales arcillosos) en las caras exteriores de los muros, contra la fuerza de flotación; tal relación debe ser mayor a 1.5 para mantener un Factor de Seguridad Mínimo.

$$FS = \frac{W_T + FCR}{F_{VA}} \quad (19)$$

Donde FS , es el factor de seguridad de flotación $> 1,5$; W_T , es el peso total de la estructura, incluyendo muros, losa, etc. en kg/m ; FCR , es la fuerza de adherencia (materiales arcillosos) en caras exteriores de los muros.

$$FCR = C_r * A_L \quad (20)$$

Donde A_L , es el área lateral de la estructura, m^2/m y C_r , es la Cohesión, en kg/m^2 .

En caso de que la fuerza de flotación sea mayor a la fuerza que se opone (peso de la estructura), será necesario proponer un aumento en el espesor de la estructura, un relleno más pesado o alguna otra medida que garantice la estabilidad de las obras de drenaje de tal forma que no se exceda la resistencia mecánica del suelo. Las tuberías se pueden lastrar y en el caso de las tuberías de PEAD-C se pueden perforar las corrugas para ingreso del agua freática, procurando no dañar la pared interior o inyectarle mortero en el interior de las corrugas.

Compensación

Este proceso consiste principalmente en el análisis de asentamientos diferenciales causados por someter el suelo nativo a esfuerzos mayores a los determinados por su resistencia mecánica, para garantizar un comportamiento estable de la estructura de drenaje, frente al problema de asentamientos, evaluándose en consecuencia si el enterramiento y tubería, serán expuestos a propiciar hundimiento o levantamiento.

Es también importante conocer el peso de las distintas estructuras de pozo caja subterráneas al que se conectarán las tuberías, para la revisión de compensación y con tales valores, comparar con el diseño de zanja y tubería, para compensar entre los elementos que componen el drenaje sanitario y pluvial.

Con base en las NTC de Cimentaciones del RCDF, se definen como cimentaciones compensadas, “aquellas en las que se busca reducir el incremento neto de carga aplicado al subsuelo mediante excavaciones del terreno y uso de un cajón desplantado a cierta profundidad”. Según el incremento neto de carga aplicado al suelo en la base del cajón resulte positivo, nulo o negativo, la cimentación se denomina parcialmente compensada, compensada o sobre-compensada, respectivamente.

Paso 1. Calcular el peso de la estructura

$$w_e = C_v + C_m \quad (21)$$

Donde w_e , es el peso de la estructura en N ; C_v , es la carga viva (intensidad media), en N ; C_m , es la carga muerta en N .

Paso 2. Calcular el peso del suelo desplazado

$$w_s = V * \gamma_s \quad (22)$$

Donde w_s , es el peso suelo desplazado en N ; V , el volumen de suelo desplazado en m^3 y γ_s , es la densidad del suelo desplazado en kg/m^3 .

Paso 3. Determinar el incremento de carga y verificar el tipo de compensación que se tiene (Tabla 5).

$$\Delta W = w_e - w_s \quad (23)$$

Tabla 4. Tipo de Compensación

Parcialmente compensada	$W_e > W_s$	
Compensada	$W_e = W_s$	
Sobre compensada	$W_e < W_s$	Revisar emersión < 1 t/m^2

Se deberá tener cuidado de que no se presente un sobre-compensación excesiva, en tal caso, deberá de adoptarse otro sistema de cimentación.

Validación de Diseño

El proceso de la secuencia propuesta, tiene el punto de control principal en la fase de Diseño Hidráulico, parte de este punto y conforme se evalúan los resultados se retorna a él, hasta concluir la secuencia con certitud; puede establecerse para la totalidad del proyecto, como por tramos, acorde con los requerimientos del proyecto.

Cada fase con resultado positivo de su entregable (memoria de cálculo), confirma la validez y cumplimiento del objetivo de incrementar la certidumbre de usar tubería de PEAD-C, en suelos limo-arcillosos.

CONCLUSIONES

Ante la necesidad del país de contar con infraestructura hidráulica resiliente, es imperativo proponer proyectos de drenaje sanitario y/o pluvial con certeza de resistencia a largo plazo, ante la exposición de fuerzas externas como internas y por sus ventajas se pueden considerar con seguridad las tuberías de PEAD-C de grandes diámetros.

Los beneficios de aplicar una secuencia de diseño al realizar un proyecto de drenaje y las consideraciones propuestas, serán en una infraestructura con certidumbre, sobre su resiliencia, economía en el largo plazo y seguridad a la población, bajo la ejecución de un proyecto con apego a las normas establecidas, así como a las prácticas aceptadas de ingeniería y a los desarrollos tecnológicos disponibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Aguirre, D. R., (2014), “Plan Agua para el Futuro CDMX”, SACMEX, Ciudad de México, México.
- 2.- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (1999), *Bridge Design Specification*, Second edition.
- 3.- Moser, A. (2001). *Buried Pipe Design*, McGraw-Hill professional engineering, Second Edition.
- 4.- Oficina de Resiliencia OR CDMX, (2016). “Estrategia De Resiliencia De La CDMX”, SEDEMA, 100 Resilient Cities, AECOM, A911, Ciudad de México, México.
- 5.- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, (2017), *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*, Ciudad de México, México.